

Otto Eeronheimo

NB-IOT JA SEN SOVELTUVUUS PAIKKANNUKSESSA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Otto Eeronheimo: NB-LoT ja sen soveltuvuus paikannuksessa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2022

Esineiden internet ja siihen liittyvät teknologiat ovat yksi langattomien verkkojen kasvavista sovellusalueista. Esineiden internetillä tarkoitetaan erilaisia laitteita, jotka on liitetty internetiin ja jotka kykenevät esimerkiksi havainnoimaan ympäristöään sensoreiden avulla. Laitteiden havainnoimaa dataa voidaan tallentaa sovelluskohtaisille palvelimille jatkokäsittelyä ja analysointia varten. Käyttökohteen mukaan loT-laitteille (engl. Internet of Things) ja loT-verkoille on olemassa erilaisia suunnitteluvaatimuksia ja ominaisuuksia. Yksi loT:n sovellusalueista on vähäisen virrankulutusten ja kustannuksien, sekä pitkien välimatkojen etäisyyksillä toimivat LPWAN-verkot (engl. Low Power Wide Area Network). Pitkät kantamat mahdollistavat LPWAN-tekniikoille uusia käyttökohteita, sekä niitä voidaan toteuttaa erilaisin tavoin riippuen järjestelmän käyttötarkoituksista.

Tämän työn tavoitteena oli selvittää pitkän kantaman loT-verkoissa toimivien laitteiden, erityisesti NB-loT-laitteiden (engl. Narrow Band Internet of Things) paikannuskykyä ja paikannuksen tarkkuutta. Tässä työssä käsiteltävä NB-loT-teknologia hyödyntää LTE-teknikkaa (engl. Long Term Evolution) tiedonsiirrossa ja kuuluu LPWAN-teknologioihin. Työ on toteutettu suurilta osin teoreettisena kirjallisuuskatsauksena erilaisiin loT-teknologioihin keskittyen pitkän kantaman verkkoihin. Työssä on lisäksi toteutettu käytännön mittauksia, joissa pyrittiin selvittämään ja arvioimaan NB-loT-verkon paikannuksen suorituskykyä ja toimivuutta. Työssä suoritetuissa mittauksissa havaittiin NB-loT-laitteen paikannuksen sopivan hyvin tekniikan nykyisille käyttökohteille ja niiden vaatimuksille. Mittauksista voidaan myös todeta NB-loT-laitteella tehdyn paikannuksen olevan toimiva niin kaupunkialueella kuin kaupunkialueen ulkopuolella.

Pitkät kantamat loT-laitteiden muodostamissa verkoissa tuottavat järjestelmään erilaisia haasteita. Matalat signaalitehot ja häiriöt tiedonsiirtokanavissa tekevät pitkien kantamien saavuttamisesta vaikeaa samalla, kun laitteiden virrankulutus ja kustannukset pyritään minimoimaan. Standardointi pitkien kantamien loT-verkkojen ja erityisesti mobiiliverkkopohjaisten ratkaisujen kehityksessä pyrkii nyt ja tulevaisuudessa kehittämään mahdollisimman tehokkaita ratkaisuja ongelmien selvittämiseksi. Pitkien kantamien loT-verkot voidaan toteuttaa käyttämällä joko olemassa olevaa verkkoinfrastruktuuria tai kaupalliset toimijat voivat toteuttaa omia ratkaisujaan. Markkinoiden painostus ja käyttökohteiden monimuotoistuminen edesauttavat alan jatkuvaa kehitystä ja täten standardointi voi olla paikoin hyvin nopeaa.

Pitkän kantaman loT-verkoille on olemassa erilaisia käyttökohteita ja sovellusalueita. Nykyisissä pitkien kantamien loT-verkoissa, kuten NB-loT-verkkojen tiedonsiirrossa, on usein pidempiä viiveitä kuin esimerkiksi matkapuhelinten tiedonsiirrossa. Myös tiedonsiirrossa lähetettävät datamäärät ovat usein pienempiä, joten tällaiset ominaisuudet asettavat reunaehjoja myös tekniikan käyttökohteille. Useimmiten pitkien kantamien loT-teknikat soveltuvat parhaiten erilaisiin mittaus- ja havainnointijärjestelmiin. Monissa mittaussovelluksissa pitkien kantamien loT-teknikoiden tiedonsiirto on tarpeeksi reaaliaikaista ja datamäärät säilyvät pieninä. Pitkien kantamien loT-verkot toimivat hyvin myös haastavissa olosuhteissa, joissa WLAN-teknikoiden (engl. Wireless Local Area Network) tiedonsiirtokyky heikkenee nopeasti. Tämän ominaisuuden vuoksi esimerkiksi NB-loT-teknikka soveltuu hyvin käytettäväksi myös kaupunkialueilla ja sisätiloissa. Käyttökohteiden kasvaessa pitkien kantamien loT-teknikoihin kehitetään uusia ominaisuuksia, jotka on toteutettu huomioiden laitteiden ja verkkojen rajoitukset. Esimerkiksi paikantaminen NB-loT-teknikassa on toteutettu soluverkkopohjaisesti eikä käyttämällä perinteisempiä satelliittiperusteisia järjestelmiä. Yksi suurimmista syistä soluverkkopohjaisen paikannuksen kehittämiseksi satelliittiperusteisen järjestelmän sijaan on virrankulutuksen minimointi; satelliittiperusteiset järjestelmät, kuten GNSS (engl. Global Navigation Satellite System) vaativat toimiakseen huomattavasti enemmän virtaa päätelaitteelta suhteessa soluverkkopohjaiseen paikantamiseen. Paikannusominaisuus on tärkeä pitkien kantamien loT-verkkojen kehityksessä ja se mahdollistaa useita uusia sovelluskohteita tekniikan hyödyntämiselle.

Avainsanat: Esineiden Internet, loT, LPWAN, NB-loT, Paikannus, OTDOA
Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	1
2 IOT JA NB-IOT.....	3
2.1 IoT-laitteet ja verkot.....	3
2.2 Pitkän kantaman IoT-verkot	5
2.2.1 Lisensoimattomat taajuusalueet.....	5
2.2.2 Lisensoidut taajuusalueet.....	6
2.3 NB-IoT	7
2.4 NB-IoT tekninen toteutus	8
2.4.1 Fyysinen kerros	9
2.4.2 NB-IoT-verkon arkkitehtuuri	11
3 PAIKANNUS NB-IOT-VERKOISSA.....	13
3.1 Paikannus langattomissa verkoissa ja IoT-sovelluksissa.....	13
3.2 Paikannusmenetelmiä NB-IoT-verkoissa.....	14
3.3 Paikannuksen suorituskyky ja tarkasteltavat parametrit	18
4 PAIKANNUSMITTAUKSET NB-IOT-VERKOISSA	20
4.1 Mittausten järjestelyt	20
4.1.1 Mittalaitteet ja alustat	20
4.1.2 POLTE-paikannusjärjestelmä	21
4.2 Mittaukset	22
4.2.1 Tampereen kaupunkialue.....	22
4.2.2 Mittaukset harvaan asutulla alueella	24
4.3 Tulokset ja niihin vaikuttavat tekijät	26
5 YHTEENVETO.....	29
LÄHTEET	30

LYHENTEET JA MERKINNÄT

5G	Viidennen sukupolven matkapuhelinverkko (engl. Fifth Generation)
IoT	Esineiden internet (engl. Internet of Things)
NB-IoT	Soluverkkopohjainen pitkän kantaman IoT-tekniikka (engl. Narrow Band Internet of Things)
GNSS	Satelliittipaikannusjärjestelmä (engl. Global Navigation Satellite System)
3GPP	Soluverkkopohjaisten järjestelmien standardointiin keskittynyt organisaatio (engl. Third Generation Partnership Program)
LPWAN	Virrankulutukseltaan matalat pitkien kantamien verkot (engl. Low Power Wide Area Network)
NFC	Lyhyen kantaman tiedonsiirtotekniikka (engl. Near Field Communication)
GSM	Toisen sukupolven matkapuhelinverkko (Global System for Mobile Communications)
LoRa	Fyysisen kerroksen tiedonsiirtotekniikka (engl. Long Range)
LoRaWAN	LoRa-tekniikkaa hyödyntävä LPWAN-tekniikka
LTE	Neljännän sukupolven langaton tiedonsiirtotekniikka (engl. Long Term Evolution)
LTE-M	Soluverkkopohjainen pitkän kantaman IoT-tekniikka
eMTC	LPWAN-standardi (engl. enhanced Machine Type Communications)
FDD	Tiedonsiirron kaksisuuntaisuustekniikka (engl. Frequency Division Duplexing)
OFDMA	Fyysisen kerroksen kanavointitekniikka (engl. Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
eNB	LTE-tekniikassa käytetty tukiasema (engl. evolved Node B)
WLAN	Lyhyen kantaman langaton tiedonsiirtotekniikka (Wireless Local Area Network)
OTDOA	Signaalin havaittuun saapumisaikaerotukseen perustuva paikannustekniikka (engl. Observed Time Difference of Arrival)
RSS	Vastaanotetun signaalin tehoon perustuva paikannustekniikka (engl. Received Signal Strength)
CSI	Sormenjälkiperusteinen, tiedonsiirtokanavan ominaisuuksiin perustuva paikannustekniikka (engl. Channel State Information)
CID	Tukiaseman palveleman solun tunniste (engl. Cell ID)
NPRS	Soluverkkopohjaisessa paikannuksessa käytettävä kapeakaistainen referenssisignaali (engl. Narrowband Position Reference Signal)
RSRP	Referenssisignaalin vastaanotettu teho (engl. Reference Signal Received Power)
RSRQ	Referenssisignaalin vastaanotettu laatu (engl. Reference Signal Received Quality)
SINR	Signaalin voimakkuuden suhde kohinaan ja interferenssiin (engl. Signal to Interference and Noise Ratio)
QPSK	Vaihe-eroihin perustuva modulaatiotekniikka (engl. Quadrature Phase Shift Keying)
API	Ohjelmointirajapinta (engl. Application Programming Interface)

1 JOHDANTO

2010-luvun aikana IoT-teknioiden (engl. Internet of Things) kehitys on kiihtynyt erilaisten soluverkkopohjaisten mobiiliverkkojen ja niihin liittyvien sidosryhmien paineistuksesta. IoT tarkoittaa esineiden internetiä, joka on konsepti siitä, että aikaisemmin internetiin kytkemättömät laitteet liitetään internetiin. Kehitystyössä on huomioitu etenkin laitteiden välinen kommunikointi ja yhä enemmän kiinnostusta on herättänyt pitkien kantamien IoT-verkot ja siinä toimivat IoT-laitteet. Yleisesti pitkän kantaman IoT-tekniikat pyrkivät sellaisille markkinoille, joissa laitteiden tunnusomaisina vaatimuksina ovat muun muassa äärimmäisen vähäiset kustannukset ja virrankulutus sekä laajat peittoalueet. Kuljettaessa kohti 5G-aikakautta ja 5G-tekniikan mahdollistamia sovelluksia, IoT-laitteiden käyttökohteiden määrän oletetaan kasvavan räjähdysmäisesti [10 s. 2–3].

Tässä työssä käsiteltävä NB-IoT-tekniikka (engl. Narrowband Internet of Things) on yksi IoT-laitteiden ja verkkojen kehityskohteista. NB-IoT on pitkän kantaman soluverkkopohjainen IoT-tekniikka, jolle tunnusomaisia piirteitä ovat pitkät kantamat, vähäinen virrankulutus ja kustannukset, sekä kapea käytössä oleva tiedonsiirtokaista. Aikaisemmin NB-IoT-tekniikan käyttökohteet ovat lähes kokonaan liittyneet sensoreiden mittauksiin, mutta uudet ominaisuudet, kuten paikannus mahdollistavat uusia NB-IoT-tekniikkaa hyödyntäviä sovelluksia [10 s. 2–3]. Arviolta noin 75 % tulevista IoT-käyttökohteista hyötyisi paikannusominaisuudesta esimerkiksi puettavissa IoT-laitteissa tai omaisuuden seurannassa. Monille varsinkin pitkän kantaman IoT-laitteille satelliittipohjaiset paikannusmenetelmät eivät ole vaihtoehto GNSS-järjestelmän (engl. Global Navigation Satellite System) käyttämisen virrankulutuksen takia. Pitkän kantaman IoT-verkot on myös suunniteltu toimivan satelliittipaikannuksen näkökulmasta haastavissa olosuhteissa, kuten sisätiloissa tai huonon kuuluvuuden maastoissa. Tämän vuoksi 3GPP on yhä enemmän kiinnittänyt huomiota julkaisun 14 jälkeen soluverkkopohjaisten paikannusratkaisujen kehittämiseksi IoT-laitteille [20].

Tässä työssä tutkitaan soluverkkopohjaista NB-IoT-tekniikkaa luvussa 2, jonka jälkeen kolmannessa luvussa syvennyttään erilaisiin paikannusmenetelmiin NB-IoT-verkoissa. Neljännessä luvussa tutkitaan käytännössä paikannustarkkuutta ja paikannuksen ominaisuuksia soluverkossa NB-IoT-päätelaitteella. Lisäksi neljännessä luvussa pohditaan,

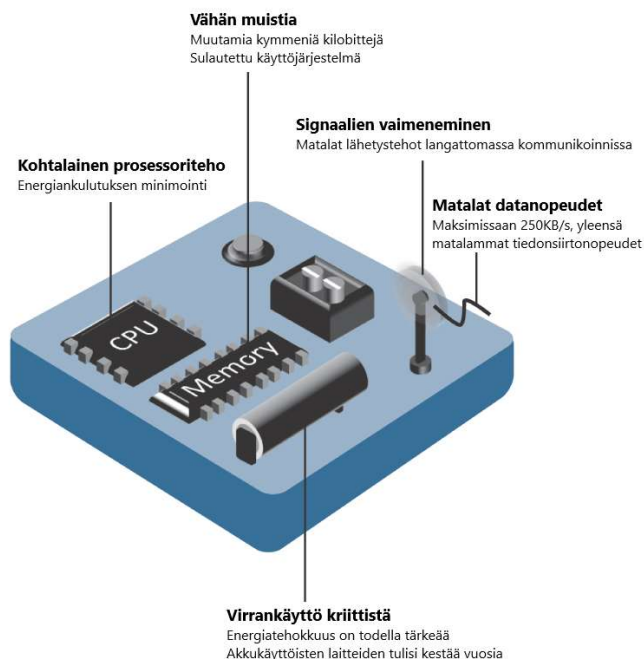
kuinka tarkka ja soluverkkopohjainen paikannus on tällä hetkellä verrattuna GNSS-järjestelmään. Viidennessä kappaleessa esitetään lyhyesti tulevaisuuden suuntauksia, sekä muodostetaan yhteenveto työn sisällöstä.

2 IOT JA NB-IOT

Esineiden internet on jatkuvasti kehittyvä konsepti tarkoittaen yksinkertaisimmillaan joukkoa internetiin kytkettyjä laitteita, joiden tehtävänä on kerätä dataa ja lähettää se internetin välityksellä esimerkiksi pilvitalennuspalveluun tallennettavaksi. Käyttötarkoituksen mukaan tämä internetiin liitettyjen laitteiden keräämä ja lähettämä data analysoidaan ja se toimii osana toiminnallista järjestelmää. IoT-tekniikan odotetaan tuovan uusia innovaatioita useille erilaisille sovellusalueille, kuten tulevaisuuden kaupunkeihin, liikenteeseen, teolliseen tuotantoon ja maatalouteen. Sensoreita voidaan ottaa käyttöön matalilla kustannuksilla ja erilaisten sensorien kirjon laajuus ja nykyaikaiset tiedonsiirtotekniikat takaavat IoT-tekniikan kehityksen ja soveltuvuuden entistä laajemmin käytettäväksi [1]. Tässä luvussa määritellään IoT-laitteet ja verkot yleisellä tasolla, jonka jälkeen esitellään pitkän kantaman IoT-verkot ja lopuksi syvennyttään NB-IoT-tekniikkaan.

2.1 IoT-laitteet ja verkot

Esineiden internetin konseptiin kuuluu ajatus siitä, että nykyisellään internetiin liittämättömät laitteet liitetään internetiin, jotta ne voivat kommunikoida verkon välityksellä niin muiden laitteiden kuin ihmisten kanssa. Jotta laitteista saadaan kerättyä tarvittavaa dataa, täytyy sitä mitata ja aistia erilaisin keinoin. Sensorit, toimilaitteet ja niin sanotut älykkäät esineet muodostavat perustan esineiden internetissä toimiville laitteille. Älykkäät esineet voivat olla minkälaisia fyysisiä esineitä tahansa, joiden tehtävänä on havaita ja olla vuorovaikutuksissa ympäristönsä kanssa tarkoituksenmukaisella tavalla. Ympäristön havaitseminen ja sen kanssa vuorovaikutuksessa oleminen tapahtuu sensorien ja toimilaitteiden avulla. Älykkäät esineet sisältävät myös viestintälaitteen ja prosessointiyksikön, jotka ovat vastuussa sensorien keräämän datan prosessoinnista ja sen lähettämisestä eteenpäin. Usein nykyisissä IoT-verkoissa älykkäiden esineiden viestintälaitte on suunniteltu langattomaksi tuoden järjestelmään erilaisia rajoitteita, jotka vaikuttavat oleellisesti älykkäiden esineiden suunnitteluvaatimuksiin kuvassa 1 esitetyllä tavalla [2].



Kuva 1: Langattomien IoT-laitteiden suunnitteluun vaikuttavat tekijät. [2]

IoT-laitteille ja -verkoille on olemassa erilaisia tapoja toteuttaa järjestelmä käyttötarkoituksen mukaan. Eräitä parametreja, jotka vaikuttavat käytettävän tekniikan valintaan ovat tarvittava kantama IoT-laitteen ja tukiaseman välillä, käytössä oleva kaistanleveys ja energiankulutus [2]. Lyhyen kantamien IoT-verkoissa käytössä olevia tekniikoita ovat esimerkiksi ZigBee, NFC (engl. Near Field Communication) ja BLE (engl. Bluetooth Low Energy). ZigBee ja BLE toimivat kymmenien metrien vaikutusalueella, kun taas NFC on suunniteltu toimivaksi muutamien senttimetrien etäisyydellä. Näillä kyseisillä tekniikoilla on myös matala virrankulutus, joten ne sopivat hyvin käytettäväksi langattomissa IoT-järjestelmissä [3].

Pitkän kantaman LPWAN (engl. Low Power Wide Area Network) verkoille on vaatimuksena nimensä mukaisesti matala virrankulutus ja mahdollisuus pitkän kantaman langattomiin yhteyksiin. Pitkillä kantamilla tarkoitetaan tässä yhteydessä useimmiten kilometrien ja pisimmillään jopa kymmenien kilometrien matkoja, joten lyhyemmän kantaman teknologiat eivät ole tähän soveltuvia. Pitkät etäisyydet tuottavat erilaisia haasteita niin IoT-laitteille kuin verkoille. Näin ollen, kun etäisyydet kasvavat, täytyy IoT-järjestelmissä suunnitella uudelleen esimerkiksi käytetyt radiotaajuudet, modulaatiotekniikat, sekä kaistanleveys [1].

2.2 Pitkän kantaman IoT-verkot

Pitkän kantaman LPWAN-verkot kasvattavat jatkuvasti suosiotaan niin teollisuudessa kuin tutkimuksessa halvan hinnan, pitkien kantamien ja matalan virrankulutuksen vuoksi. Näistä syistä LPWAN-tekniikat ovat erityisen sopivia IoT-sovelluksille, joissa on tarkoituksena lähettää pieniä määriä dataa pitkien matkojen päähän. Pitkän kantaman IoT-verkot voidaan toteuttaa käyttämällä erilaisia taajuuskaistoja, jotka voidaan karkeasti jakaa lisensoituihin ja lisensoimattomiin taajuusalueisiin. Lisensoituilla taajuuksilla tarkoitetaan sellaisia taajuuskaistoja, joille alueellisilla matkapuhelinverkkojen operaattoreilla on voimassa oleva ja kyseisen alueen lainsäätelyelinten myöntämä lisenssi. Näillä taajuusalueilla toimivilla laitteilla tulee olla kyseistä kaistaa hallinnoivan matkapuhelinoperaattorin lupa käyttää kyseisiä taajuuksia, joka on usein kaupallinen sopimus kaistan käytöstä. Lisensoimattomilla taajuusalueilla voi taas toimia mikä tahansa laite, kunhan se täyttää paikallisen lainsäätelyelimen asettamat yleiset vaatimukset. Tällaisella lisensoimattomien taajuuskaistojen sääntelyllä pyritään yhdenmukaiseen ja mahdollisimman tehokkaaseen vapaan taajuusspektrin käyttöön [4, s. 327–329]. Muutamia yleisimpiä lisensoimattomilla taajuusalueella toimivia pitkän kantaman IoT-tekniikoita ovat LoRaWAN ja Sigfox.

2.2.1 Lisensoimattomat taajuusalueet

Sigfox-tekniikka kehitettiin samannimisen, ranskalaisen yrityksen Sigfoxin toimesta vuonna 2010. Sigfox-yritys on LPWAN-verkko-operaattori, joka tarjoaa markkinoille IoT-ratkaisuja patentoiduilla teknologioilla. Sigfox-järjestelmään kuuluu omat tukiasemat, jotka ovat yhteydessä pakettikytkentäiseen IP-verkkoon. IoT-päätelaitteet ovat yhteydessä näihin tukiasemiin käyttäen kapeaa 100 Hz kaistanleveyttä ja BPSK-modulaatiotekniikkaa. Kapea kaistanleveys ja käytetty modulaatiotekniikka mahdollistavat järjestelmälle matalan kohinatason ja tätä myöten myös hyvän energiatehokkuuden, mutta vain 100 bps tiedonsiirtonopeuden. Aluksi Sigfox-järjestelmä mahdollisti kommunikoinnin vain ylälinkin suuntaan, mutta myöhemmin järjestelmää kehitettiin mahdollistamaan myös kaksisuuntaiset yhteydet vaikkakin alalinkin suuntaan kulkevien viestien määrä on rajoitettu vain neljään päivässä. Ylälinkin suuntaan lähetettävien, kahdeksan tavun mitaisten viestien määrä on rajoitettu 140 kappaleeseen vuorokaudessa, joten jokaisesta ylälinkin suuntaan lähetetystä viestistä ei ole mahdollisuutta saada kuittausviestiä [5, s. 2–3].

LoRaWAN on LoRa-allianssin standardoima arkkitehtuuri, joka tarjoaa Sigfoxin lisäksi erilaisen mahdollisuuden IoT-laitteille kommunikoida tukiasemien kanssa lisensoimattomilla taajuusalueilla. LoRa on fyysisen kerroksen tiedonsiirtotekniikka, joka Sigfoxin tavoin tarjoaa pitkän kantaman, matalan virrankulutuksen ja tiedonsiirtonopeuden [6]. LoRa hyödyntää hajaspektritekniikoita fyysisen kerroksen tiedonsiirrossa, joka vähentää kanavan aiheuttamaa kohinaa tehden järjestelmästä vastustuskykyisemmän kohinalle, sekä signaalin vaikeammin häiritäväksi ja huomattavaksi. LoRa voi myös sopeutua erilaisiin käyttökohteisiin käytetyn hajautuskertoimen avulla: korkeampi hajautuskerroin mahdollistaa suuremman kantaman, mutta samalla vähentää tiedonsiirtonopeutta [5, s. 2–3]. LoRaWAN tarjoaa ylempien protokollakerrosten ominaisuudet LoRa-kerroksen ylle. Toisin kuin Sigfoxin tapauksessa, LoRaWAN jakaa päätelaitteet kolmeen luokkaan riippuen järjestelmästä halutuista ominaisuuksista pääasiassa latenssin ja virrankulutuksen suhteen. LoRaWAN tarjoaa myös linkki- ja sovelluskerrosten ominaisuuksia, kuten parannuksia turvallisuudessa ja yhteyden IP-verkkoon [7].

2.2.2 Lisensoidut taajuusalueet

Lisensoiduilla taajuusalueilla toimivia, soluverkkopohjaisia LPWAN-tekniikoita ovat muun muassa LTE-M, jota on usein kutsuttu myös nimellä LTE Cat-M1 ja NB-IoT. LTE-M-tekniikkaa alettiin kehittämään, kun haluttiin tehdä olemassa olevasta LTE-infrastruktuurista sopivampaa vähäisten virrankulutuksen ja pitkän kantaman IoT-laitteita varten. Aikaisemmin tällaisia MTC-yhteyksiä (engl. Machine Type Communication) hoidettiin GSM-mobiiliverkon avulla, mutta muutokseen oli tarvetta IoT-laitteiden määrän ja vaatimusten kasvaessa. LTE-M käyttää tiedonsiirrossa samankaltaisia tekniikoita kuin perinteiset LTE-verkot ja pääasiassa LTE-M on toteutettu olemassa olevien LTE-tekniikoiden päälle. Tämän vuoksi samassa LTE-solussa yksi tukiasema voi palvella samanaikaisesti niin LTE-M-käyttäjiä kuin tavallisia LTE-verkon käyttäjiä. Kuten muissakin LPWAN-tekniikoissa, myös LTE-M-tekniikkaan vaikuttavat samat suunnitteluvaatimukset; matalat kustannukset, pitkä akunkesto ja pitkän kantaman peitto. Nämä ominaisuudet on otettu huomioon lähinnä LTE-M-tekniikan fyysisen kerroksen toteutuksessa [4, s. 136–139].

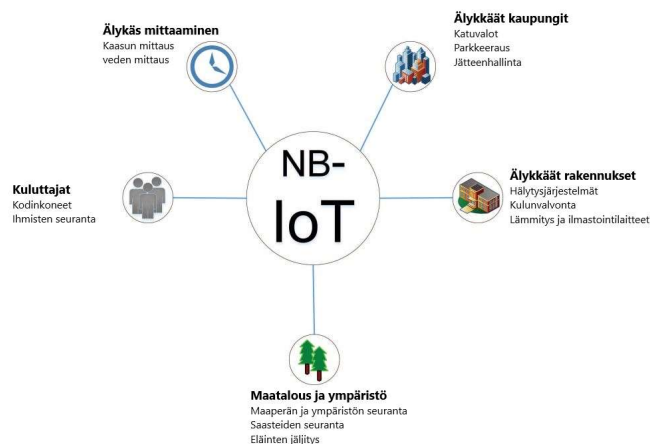
LTE-M-tekniikan rinnalle kehitettiin myös NB-IoT-tekniikka, joka on myös osa 3GPP:n standardoimia LTE-määritelmiä julkaisusta 13 eteenpäin. Täten myös NB-IoT käyttää monia osa-alueita olemassa olevasta LTE-tekniikasta taatakseen matalan virrankulutuksen, pitkän kantaman ja edullisen hinnan. NB-IoT on erityisesti suunniteltu tilanteisiin, jossa yhdessä solussa on tarve palvella suurta määrää IoT-laitteita. Toinen tärkeä tavoite

NB-IoT-tekniikan kehitykselle on ollut maksimoida IoT-laitteiden käyttöönoton joustavuus verkoissa, jota varten NB-IoT:lle on kehitetty erilaisia toimintamalleja [4, s. 218–219].

2.3 NB-IoT

NB-IoT spesifioitiin ensimmäistä kertaa 3GPP:n julkaisussa 13, jossa esiteltiin kaksi tärkeää uutta ominaisuutta vastaamaan alati kasvavaan soluverkkopohjaisen LPWAN-IoT-laitteiden kehitykseen. Ensimmäinen ominaisuus oli uusi käyttäjälaitekategoria eMTC (engl. enhanced Machine Type Communication), jossa kommunikointi tapahtuu osana LTE-kantoaaltoa kapeammalla 1,4 MHz kaistanleveydellä. Määritelmässä on pyritty esimerkiksi kehittämään laitteiden kuuluvuutta rakennusten sisätiloissa. Toinen julkaisussa 13 esitetty ominaisuus oli NB-IoT. NB-IoT-tekniikassa LTE-ominaisuuksien uudelleenkäyttö ja jatkokehitys kattamaan kaupallisten IoT-verkkojen vaatimukset johtivat hyvinkin nopeaan spesifointiin [8]. Julkaisun 13 jälkeen NB-IoT-tekniikka on kehittynyt isoin askelein eteenpäin 3GPP:n julkaisuissa 14–17, joissa NB-IoT-tekniikkaa on paranneltu muun muassa spektraalisen tehokkuuden, virrankulutuksen, latenssin ja paikannussovellusten muodossa. Nämä ovat sittemmin mahdollistaneet uusia käyttökohteita NB-IoT-tekniikalle. NB-IoT-tekniikkaa ei kuitenkaan sovi sekoittaa 3GPP:n julkaisuissa 16 ja 17 esiintyviin NR-IIoT- (engl. New Radio Industrial Internet of Things) ja NR-Lite- tekniikoihin. Edellämainitut tekniikat ovat suunniteltu IoT-käyttökohteille, joissa vaaditaan korkeaa tiedonsiirtonopeutta, luotettavuutta ja matalia viiveaikoja [10 s. 2-3].

Ominaisuuksiensa vuoksi NB-IoT-tekniikka sopii parhaiten sovelluksiin, joissa järjestelmä on staattinen ja jossa voidaan vaatia suhteellisen reaaliaikaista tiedonsiirtoa. Järjestelmä ei saa kuitenkaan olla herkkä tiedonsiirron viiveille. Tästä syystä NB-IoT-tekniikka soveltuu hyvin erilaisiin mittaus- ja raportointijärjestelmiin. Ympäristön ja esimerkiksi maatalouden sovelluksissa datan lähetyksen väliaika voi olla tunteja tai päiviä, jos esimerkiksi mitataan maaperän tai ilmaston tilaa. Erilaisia käyttökohteita NB-IoT-tekniikalle on esitetty kuvassa 2, joista yksi sovellusalue on älykkäät kaupungit.



Kuva 2: Erilaisia NB-IoT-käyttökohteita. [11]

Hyvä kuuluvuus on yksi NB-IoT:n etuja verrattuna moniin muihin kaupunkialueilla käytettäviin teknologioihin, kuten WLAN-teknologioihin, sillä NB-IoT-laitteet kykenevät tiedonsiirtoon hankalissakin olosuhteissa. Esimerkiksi rakennusten kellarit, sisäpihat tai parkkipaikat eivät aiheuta isoja häiriöitä NB-IoT:n tiedonsiirrolle. Tästä syystä erilaisia mittareita, valvonta- ja raportointijärjestelmiä voidaan asentaa esimerkiksi liikennevaloihin, rakennusten sähkönkulutuskeskuksiin ja älykkäille parkkipaikoille. Älykkäiden kaupunkien konsepti tähtää siis älykkääseen kaupungin infrastruktuurin hallintaan kuten sähkön, kaasun, ja vedenkulutuksen valvonta ja hallinta. Myös älykäs liikenne, kuten ruuhkanhallinta, teiden kunnan analysointi ja älykäs parkkeeraus voisi kuulua älykkään kaupungin konseptiin [11]. Kuten kuvasta 2 voidaan huomata, NB-IoT soveltuu käytettäväksi myös useampaan muuhun käyttötarkoitukseen ja sovelluskohteiden määrä kasvaa jatkuvasti.

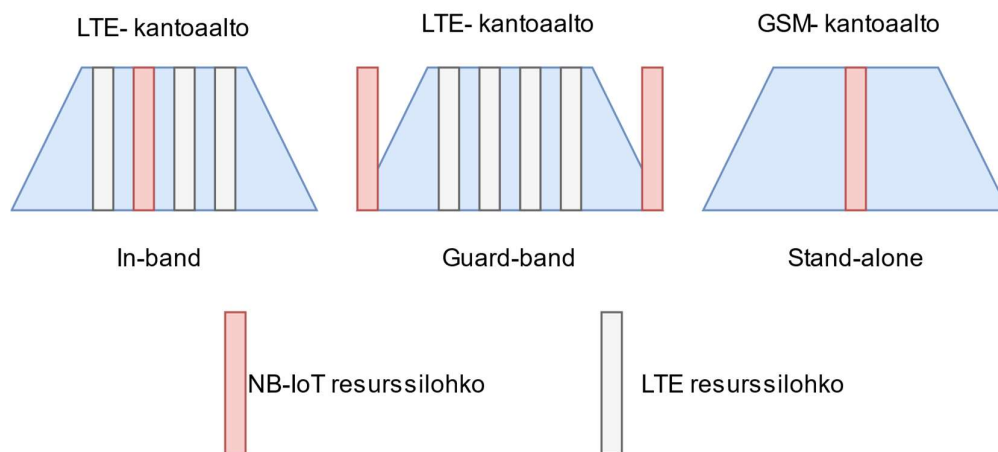
2.4 NB-IoT tekninen toteutus

NB-IoT on toteutettu teknisesti hyvin samankaltaisesti kuin esimerkiksi LTE-M-tekniikka. Moni tekninen ominaisuus on kehitetty huomioiden olemassa olevan LTE-infrastruktuurin vaatimukset ja ominaisuudet. Tällöin NB-IoT-laitteiden käyttö ja kehitys on mahdollisimman suoraviivaista ja sen integroiminen toimivaksi yhdessä LTE-järjestelmän kanssa on mahdollisimman helppoa. Tässä kappaleessa esitellään ensiksi NB-IoT:n fyysisen kerroksen toteutus erityispiirteineen. Fyysisen kerroksen esittelyn jälkeen kuvataan NB-IoT-tekniikan arkkitehtuuri ja siinä toimivat erilaiset kokonaisuudet yleisellä tasolla.

2.4.1 Fyysinen kerros

Fyysisellä kerroksella NB-LoT-tekniikka on toteutettu mahdollistamaan varsinaiset tiedonsiirroliset haasteet, jotka liittyvät esimerkiksi pitkien kantamien ja vähäisen energi-ankulutuksen vaatimuksiin. Tällaisia teknisiä ratkaisuja on tehty tiedonsiirtokanavassa muun muassa käytettävien aaltomuotojen, kaistanleveyden ja erilaisten toimintatilojen (engl. Operation Modes) avulla.

Tavallisesti NB-LoT-tekniikassa käytetään 180 kHz kaistanleveyttä, joka vastaa yhtä LTE-tekniikassa käytettävää resurssilohkoa. LTE-järjestelmässä tällainen 180 kHz lohko on pienin resurssiyksikkö, joista koostuu LTE-kanavassa käytetty kokonaiskaistanleveys. NB-LoT:n käyttämä resurssilohko voi sijoittua kolmella erilaisella tavalla LTE-kantoaaltoon ja näistä muodostuvat eri toimintatilat. Toimintatila yleensä valitaan käytettävän sovelluksen tai ympäristön mukaan, sillä eri toimintatiloilla on erilaisia tiedonsiirrolisia ominaisuuksia. Tiedonsiirtotiloja kutsutaan in-band, guard band ja stand alone -tiloiksi, jotka on havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3: Resurssilohkojen sijoittuminen eri NB-LoT-toimintatiloissa.

In-band toimintatilassa yksi tai useampi LTE-resurssilohko on varattu NB-LoT:n käyttöön LTE-kantoaallon sisällä. Vaikka NB-LoT-resurssilohko on LTE-kantoaallon sisällä, se käyttää omia aika- ja taajuusresurssejaan eikä LTE:lle varattuja resursseja kuten referenssisignaaleja. In-band tila on LTE-palveluntarjoajalle tehokkain tapa toimittaa NB-LoT-palveluja, sillä LTE:n resurssilohkoja voidaan suoraan allokoida NB-LoT:n käyttöön. Tällöin LTE- ja NB-LoT-liikenne sisältyvät samalle taajuuskaistalle. Guard-band toimintatilassa NB-LoT hyödyntää LTE-kantoaallon suojakaistaa tiedonsiirrossa. LTE-kaistojen väliin jää yhteensä 200 kHz käyttämätöntä taajuuskaistaa suojakaistojen muodossa, joka

riittää NB-LoT:n käyttämälle 180 kHz kaistalle. Guard-band toimintatilassa LTE järjestelmän ei tarvitse varata resurssilohkojaan NB-LoT:n käyttöön. Kuitenkin kun tiedonsiirrossa käytetään suojakaistaa, tiedonsiirron luotettavuus ja suorituskyky laskevat järjestelmässä. Stand-alone toimintatilassa data lähetetään käyttäen GSM-kantoaaltoa. Stand-alone toimintatilassa NB-LoT korvaa yhden GSM-kantoaallon ja tämä mahdollistaa tehokkaan GSM-kantoaaltojen uudelleenjärjestämisen loT-sovelluksia varten [14].

Kun NB-LoT ensimmäistä kertaa esiteltiin 3GPP:n julkaisussa 13, järjestelmä käytti kanavoinnissa FDD-perusteista (engl. Frequency Division Duplexing), kaksisuuntaisuuden (engl. Duplexing) mahdollistavaa tiedonsiirtotekniikkaa. Myöhemmin optimoimalla virrankulutusta ja järjestelmän monimutkaisuutta päätettiin, että HD-FDD-tekniikka (engl. Half Duplex Frequency Division Duplexing) on sopivampi käytettäväksi NB-LoT:n tekniset vaatimukset huomioon ottaen. HD-FDD tarkoittaa yksinkertaisimmillaan kaksisuuntaisuustekniikkaa, jossa NB-LoT-järjestelmä voi lähettää dataa tai vastaanottaa sitä, mutta tiedonsiirto ei voi olla samanaikaista. Erona 3GPP:n julkaisussa 13 esitettyyn FDD-tekniikkaan, HD-FDD käyttää ylälinkissä ja alalinkissä vain yhtä kanavaa tiedonsiirtotapahtumissa, kun taas FDD-tekniikassa ylä- ja alalinkille on määritelty eri kanavat. HD-FDD-tekniikan tiedonsiirtotapahtumien välissä on suoja-aika, jonka lähettäjän ja vastaanottajan tulee odottaa ennen seuraavaa tiedonsiirtotapahtumaa [15].

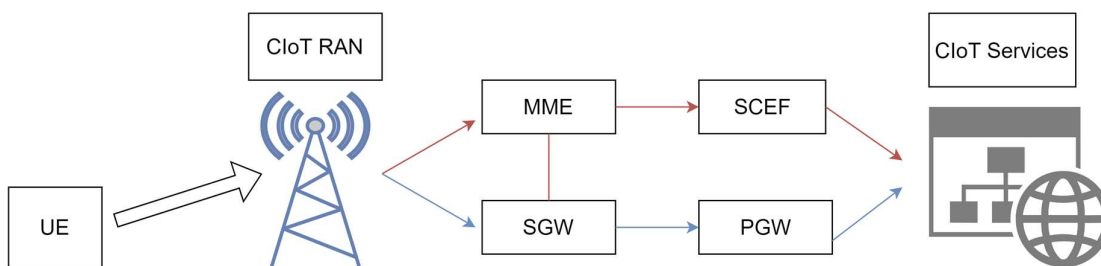
Modulaatiotekniikkana NB-LoT käyttää alalinkissä LTE:n tavoin OFDMA-tekniikkaa (engl. Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ja ylälinkissä yhden kantaallon OFDMA-tekniikkaa SC-FDMA:ta (engl. Single Carrier Frequency Division Multiple Access). Alalinkki käyttää kahtatoista alikantaaaltoa, joista yhdelle alikantaaallolle on varattu 15 kHz kaistanleveys. Yhteensä nämä tuottavat 180 kHz kaistanleveyden, joka siis vastaa yhtä LTE:n resurssilohkoa. On hyvä huomata, että OFDMA-symbolit moduloidaan käyttämällä vaihe-eroihin perustuvaa QPSK-modulaatiotekniikkaa (engl. Quadrature Phase Shift Keying) [15].

Fyysisellä kerroksella määritellään myös erilaisia signaaleja ja tiedonsiirtokanavia, jotka mahdollistavat NB-LoT-järjestelmän toiminnan. Tällaisia toiminnallisuuksia ovat fyysisellä kerroksella esimerkiksi solunhankinta (engl. Cell Acquisition), satunnaispääsy (engl. Random Access) tai tiedonsiirtokanavan arviointi (engl. Channel Estimation). Solunhankinnassa käyttäjälaite synkronoi aika- ja taajuusresursseja solua palvelevan tukiaseman kanssa saadakseen selville esimerkiksi solun fyysisen tunnisteen ja järjestelmän saata-villa olevan kaistanleveyden. Satunnaispääsyprosessissa käyttäjälaite ottaa yhteyden tukiasemaan saadakseen selville oman yksilöivän tunnisteen, jota käyttäen laite voi

saada yhteyden verkkoon solua palvelevan tukiaseman kautta. Tiedonsiirtokanavan arvioinnissa käyttäjälaite pyrkii saamaan tietoa käytettävästä tiedonsiirtokanavasta [16 s. 5–15].

2.4.2 NB-IoT-verkon arkkitehtuuri

NB-IoT-verkon arkkitehtuuri koostuu pääasiassa NB-IoT-käyttäjälaitteista, radiopääsyverkosta, runkoverkosta ja erilaisista sovelluskohtaisista palvelimista, jotka ovat usein jonkinlaisia pilvipohjaisia ratkaisuja datan prosessoinnille ja tallentamiselle. Radiopääsyverkko (engl. Radio Access Network) on toteutettu NB-IoT-laitteille pääosin samalla tavalla kuin muillekin käyttäjälaitteille. LTE-tukiasema, eNB (engl. evolved NodeB), kommunikoi runkoverkon kanssa ja hoitaa esimerkiksi pääsynohjausta ja solunhallintaa [13]. NB-IoT käyttää LTE-tekniikassa olemassa olevaa, päivitettyä EPS-runkoverkkoa (engl. Evolved Packet System), jossa optimoidut käyttäjätasot (engl. User Plane) ja ohjaustasot (engl. Control Plane) on kehitetty soluverkkopohjaisten IoT-sovellusten tarpeille. Kun NB-IoT-laite lähettää dataa tukiasemalle, viesti välitetään joko pakettikytkentäiseen verkkoon tai ei-pakettikytkentäiseen verkkoon. Mikäli data halutaan siirtää pakettikytkentäiseen verkkoon, tapahtuu tiedonsiirto radiopääsyverkossa SGW-yhdyskäytävän (engl. Serving Gateway) ja PGW-yhdyskäytävän (engl. Packet Gateway) kautta. Mikäli vastaanotettu data ei kuulu pakettikytkentäiseen verkkoon, se kuljetetaan SCEF:n (engl. Service Capability Exposure Function) kautta, joka tarjoaa abstraktin käyttöliittymän tällaisille palveluille [12 s. 16–17]. SCEF-funktio on tärkeä osa 3GPP:n arkkitehtuuria, joka takaa tarvittavien, ei-pakettikytkentäisten palveluiden saatavuuden turvallisesti ulkoisille toimijoille ja laitteille. Tämä mahdollistaa LPWAN-tekniikoiden, kuten NB-IoT:n toimivuuden soluverkoissa yhdessä LTE-arkkitehtuurin rinnalla. Lopulta data siirretään soluverkkopohjaisten CloT-palveluiden (engl. Cellular IoT) käytettäväksi [13]. Edellä kuvattu arkkitehtuuri on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4: NB-IoT-verkon arkkitehtuuri.

Kuten aiemmin mainittiin, NB-IoT-tekniikka ja -arkkitehtuuri perustuvat jo valmiiksi käytössä olevaan LTE-tekniikkaan. Tästä syystä on hyvä huomata, että vaikka kyseessä on NB-IoT-verkon arkkitehtuuri, niin monet siihen liittyvät kokonaisuudet palvelevat myös muita LTE-verkkoon kytkettyjä laitteita. Mahdollisuus NB-IoT-laitteiden käyttöön on tullut päivittämällä jo olemassa olevaa LTE-infrastruktuuria, jotta esimerkiksi radiopääsyverkko ja mobiliteetin hallintayksikkö, MME (engl. Mobility Management Entity), kykenevät käsittelemään myös NB-IoT-järjestelmän tiedonsiirtoa [13]. Myöhemmin LTE-verkkoon kuuluvia kokonaisuuksia on edelleen kehitetty kattamaan uudenlaisia ominaisuuksia, kuten paikannusta. Paikannuksen arkkitehtuuri ja siihen liittyvät toimijat ovat esitelyt tarkemmin kappaleessa 3.

3 PAIKANNUS NB-IOT-VERKOISSA

Kuten muitakin IoT-tekniikoita, niin myös NB-IoT-tekniikkaa kehitetään jatkuvasti kattamaan erilaisten sovellusten tarpeet ja vaatimukset. Paikannus langattomissa verkoissa on pitkälti perustunut satelliittipaikannusjärjestelmien tarjoamaan paikkatietoon, mutta monissa IoT-sovelluksissa ja etenkin virrankulutukseltaan kriittisissä pitkän kantaman verkoissa satelliittipaikannusjärjestelmän integroiminen laitteeseen ei ole tarkoituksenmukaista. Tällöin on ilmennyt tarve kehittää uudenlaisia paikannusmenetelmiä, jotka eivät vaadi päätelaitteelta isoa tallennustilaa tai monimutkaisia prosesseja. Erityisesti soluverkkopohjaisten IoT-ratkaisuiden, kuten NB-IoT:n tapauksessa tällaiset vaatimukset on kehitetty virrankulutuksen minimoimiseksi. Lisäksi satelliittiperusteisten järjestelmien toimintakyky heikkenee esimerkiksi ilmasto-olosuhteiden huonontuessa, kun taas NB-IoT-tekniikan tulisi toimia myös haastavissa olosuhteissa. Kuitenkin satelliittijärjestelmien paikannustarkkuus on parempi verrattuna pelkästään soluverkkopohjaisiin paikannusmenetelmiin nykyisissä LTE-verkoissa. [28] Tässä kappaleessa tarkastellaan paikannusta langattomissa verkoissa, jonka jälkeen syvennyttään erilaisiin NB-IoT-verkon paikannusmenetelmiin. Lopuksi pohditaan paikannuksen suorituskykyä ja erilaisia seikkoja, jotka voivat vaikuttaa paikannustarkkuuteen.

3.1 Paikannus langattomissa verkoissa ja IoT-sovelluksissa

Nykyaikana paikantaminen voidaan jakaa yleisesti kahteen menetelmään. On olemassa geometriapohjaisia menetelmiä, joissa mitataan jonkin tietyn parametrin arvoja ja käytetään niitä paikkatiedon estimoinnissa. Tällaisia parametreja ovat esimerkiksi aika, joka signaalilla kestää käyttäjälaitteelta tukiasemalle, tai kulma, jossa signaali saapuu tukiasemalle. Myös signaalitehoa mittaamalla voidaan muodostaa geometriapohjaisia hahmotelmia käyttäjälaitteen sijainnista. Toinen paikantamisen perusmenetelmistä on sormenjälkiperusteinen (engl. Fingerprinting) paikannusmenetelmä, jossa tarkasteltavat parametrit ovat samoja kuin geometriapohjaisissa menetelmissä. Oleellisena erona näiden menetelmien välillä on tunnetut pisteet, joihin parametrien arvoja verrataan ja joiden avulla sijaintitieto pyritään selvittämään. Sormenjälkiperusteisissa menetelmissä verrataan mittausparametrien arvoja tiettyyn joukkoon mittausalueelta ennalta kerättyjä pisteitä, joihin liittyy paikkatieto. Geometriapohjaisissa menetelmissä mittausparametreja verrataan joukkoon referenssilaitteita kuten tukiasemia, joilla on paikkatieto. [17 s. 61–88]

Geometriapohjainen paikannus ei tarvitse erikseen mitattuja pisteitä paikannuksessa, mutta tarvitsee tietyn määrän referenssilaitteita. Näitä perusmenetelmiä voidaan edelleen pelkistää tai jalostaa uudelleen paikannusmenetelmiksi. Merkintälaskumenetelmä (engl. Dead Reckoning) esimerkiksi perustuu aiemmin tunnettuun paikkatietoon ja jälkeensä kohteesta saatuihin tietoihin, kuten nopeuteen, suuntaan ja kuluneeseen aikaan. Soluverkkopohjaisissa sovelluksissa voi joskus olla tarpeen tietää kohteen sijainti vain solun tarkkuudella. Tällöin käyttäjälaitteen sijaintia voidaan hahmotella solua palvelevan tukiaseman sijainnin ja sen tiedonsiirtoetäisyyden, eli solun koon perusteella. [17 s. 61–88]

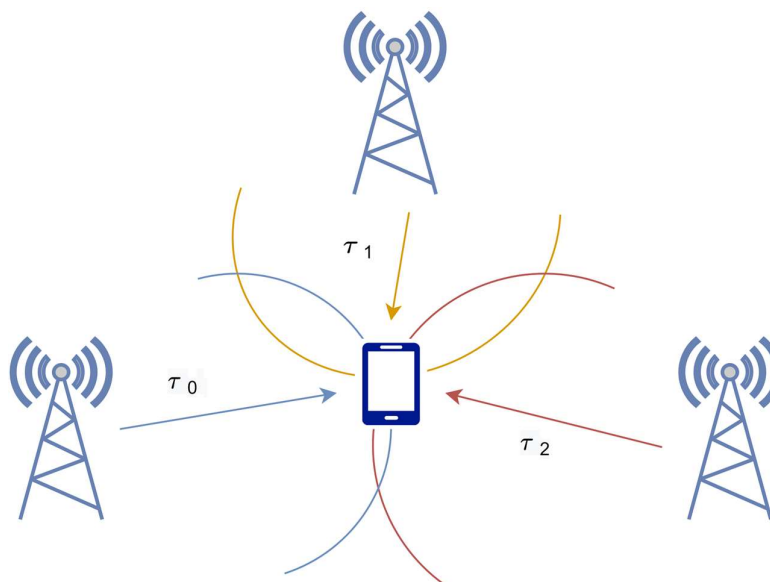
Paikannus IoT-verkoissa mahdollistaa niin uusien sovellusten kehittämisen IoT-toimintakenttään, kuin myös paikannusulottuvuuden olemassa oleviin sovelluksiin. IoT-järjestelmissä on paikannukseen monia olemassa olevia ratkaisuja, jotka käyttävät esimerkiksi aikapohjaisia mittauksia tai satelliittiperusteisia järjestelmiä paikkatiedon hahmottamiseen. LPWAN-tekniikkaa on käytetty yhdessä GNSS-järjestelmän kanssa muun muassa linja-autojen paikannukseen tai valtateiden seurantaan. Kuitenkin LPWAN-sovelluksille vaatimuksena on vähäiset kustannukset ja virrankulutus, pitkät kantamat ja siirtoyky viiveille. Myös haastavissa maastoissa ja ilmasto-olosuhteissa toimiminen on yksi LPWAN-tekniikoiden perusvaatimuksista. Tarve erillisten paikannukseen käytettävien moduulien, kuten GNSS-järjestelmän poistamiselle on ilmeinen. Tämä takaa LPWAN-järjestelmälle pienemmän virrankulutuksen, mutta vaikuttaa heikentävästi paikannustarkkuuteen. [18]

Paikannuksen toteuttamiselle IoT-verkoissa on useita haasteita. Edellä mainittujen LPWAN-verkkojen yleisten haasteiden (matala virrankulutus, pitkät kantamat jne.) lisäksi toimintaympäristöt voivat olla haastavia: tiedonsiirtokanava voi esimerkiksi altistua voimakkaan monitie-etenemisen vaikutuksille. Monien IoT-laitteiden lisääminen samalle alueelle, etenkin LPWAN-sovelluksissa altistaa yksittäisen päätelaitteen lähettämät signaalit muiden signaalien aiheuttamalle häiriölle. Johtuen LPWAN-IoT-laitteiden fyysisen kerroksen toteutuksista, myös datan häviämien ja latenssi vaikuttavat paikannuksen tarkkuuteen. Edellä mainittujen haasteiden vuoksi nykyisissä LPWAN-verkkojen paikannusmenetelmissä on keskitytty paikkatiedon karkeaan arviointiin ja lyhyemmän kantaman WLAN-verkoissa paikkatiedon hienosäätisempään arviointiin. [18]

3.2 Paikannusmenetelmiä NB-IoT-verkoissa

Kun NB-IoT-tekniikka ensimmäistä kertaa esiteltiin 3GPP:n julkaisussa 13, järjestelmä tuki paikannusta laitetta palvelevan solun CID:n (engl. Cell ID) perusteella, jonka avulla kyettiin hahmottamaan solun tarkkuudella päätelaitteen sijainti. 3GPP:n julkaisussa 14

esiteltiin edistyneempiä paikannustekniikoita, jotka voidaan jakaa kahteen parannukseen: kehitettiin tuki havaitun saapumisaikaerotuksen OTDOA (engl. Observed Time Difference of Arrival) laskennalle, sekä viimeisteltiin päätelaitteen mittausvaatimukset kehittyneemmille CID-paikannustekniikoille. Kehittyneempiä CID-mittausvaatimuksia olivat lähettäjälaitteen, joka tässä tapauksessa on LTE-tukiasema eNB ja vastaanottimen aikaeron laskenta, referenssisignaalin vastaanotettu teho RSRP (engl. Reference Signal Received Power), sekä referenssisignaalin vastaanotettu laatu RSRQ (engl. Reference Signal Received Quality). [9 s. 17–18] OTDOA on NB-IoT-järjestelmissä alalinkissä toteutettu paikannustekniikka, jossa LTE-tukiasemat lähettävät NB-IoT-päätelaitteelle NPRS-signaaleja (engl. Narrowband Position Reference Signal). Päätelaite havaitsee nämä signaalit ja lähettää raportin referenssisignaalista ylälinkissä takaisin LTE-tukiasemalle. Tällöin LTE-tukiasema voi hahmotella päätelaitteen sijainnin kaaren muotoiselle alueelle kuvan 5 mukaan, joten useamman tukiaseman osallisuus OTDOA-paikannukseen parantaa paikannustarkkuutta. NB-IoT-laitteen paikannuksessa kuitenkin tarvitaan NPRS-signaali vähintään kolmen solun tukiasemilta.

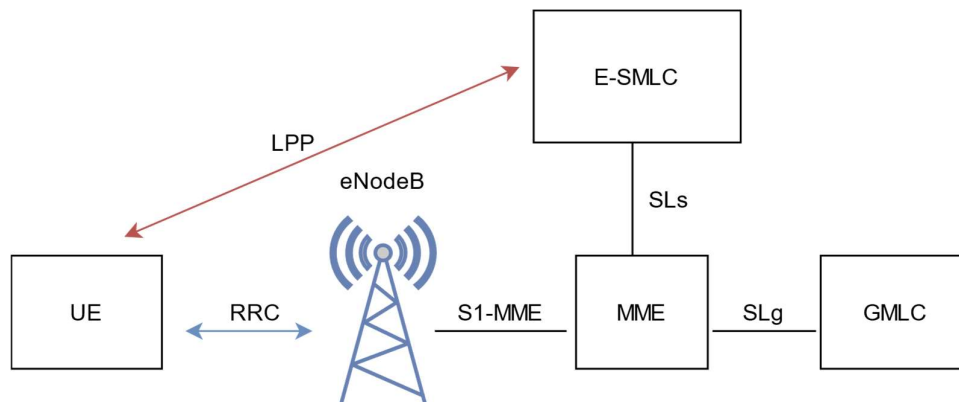


Kuva 5: OTDOA NB-IoT-järjestelmässä.

Kuvassa 5 NB-IoT-laitteille saapuvien signaalien aika ToA (engl. Time of Arrival) on kuvattu muuttujilla τ_0 , τ_1 ja τ_2 . [19]

NB-IoT-tekniikka hyödyntää NPRS-signaalia OTDOA-paikannuksen toteuttamiseen. LTE-järjestelmissä on olemassa jo nykyisellään referenssisignaali paikannuksen toteuttamiseen PRS (engl. Position Reference Signal), jota käytetään esimerkiksi LTE-M-tekniikassa. NPRS-signaali pohjautuu PRS-signaaliin, mutta NPRS-signaali on suunniteltu

käyttämään kapeampaa kaistanleveyttä ja täten mahdollistamaan pidemmän kantaman ja peiton haastavissakin olosuhteissa. Verrattaessa NB-IoT-järjestelmän OTDOA-paikannusta LTE-M-järjestelmään, paikannuksessa NPRS-signaalin käyttäminen tekee paikantamisesta hitaampaa. [20 s. 3–6] Muutoin paikannusjärjestelmän arkkitehtuuri ja toiminta on samankaltainen kuin LTE-järjestelmässä yleisesti. OTDOA-paikannusarkkitehtuuriin liittyy useita toiminnallisia kokonaisuuksia, kuten mobiliteetinhallinta MME, GMLC (engl. Gateway Mobile Location Centre) ja E-SMLC (engl. Evolved Serving Mobile Location Centre). Nämä yksiköt ja niiden väliset suhteet on esitetty kuvassa 6.

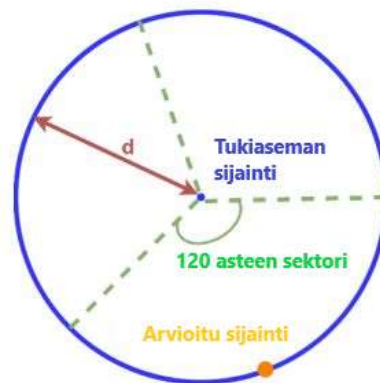


Kuva 6: OTDOA-paikannusarkkitehtuuri LTE-järjestelmässä.

Mobiliteetinhallintayksikkö alustaa paikannuksen tai saa pyynnön paikannustoiminnan alustukseen joltakin käyttäjälaitteelta tai GMLC-yksiköltä. Alustuksen jälkeen MME lähettää paikannuspalvelupyynnön E-SMLC-yksikölle SLs-rajapinnan kautta. SLs-rajapinnan kautta kulkee kaikki käyttäjälaitteeseen ja tukiasemaan liittyvät paikannuspalvelupyynnot. E-SMLC prosessoi paikannuspalvelupyynnön ja lähettää apudatan käyttäjälaitteelle, jota käytetään esimerkiksi NPRS-signaalin konfiguroimiseen. [20 s.1–3, 21 s. 9] Data kulkee MME:n ja käyttäjälaitteen välillä S1-MME-rajapinnan ja langattoman linkin kautta. Pääpiirteissään paikannus ja siihen liittyvä signalointi päätelaitteen ja E-SMLC-yksikön välillä kulkee LPP-protokollan (engl. LTE Positioning Protocol) mukaisesti (kuvassa 6 punaisella). Kuvassa RRC (engl. Radio Resource Control) viittaa radioresursien hallintaan käyttäjälaitteen ja tukiaseman välillä. [20]

NB-IoT-laitteita voidaan paikantaa myös muilla tavoin riippuen käytettävistä resursseista ja ympäristöistä. Vastaanotetun signaalitehon RSS (engl. Recieved Signal Strength) menetelmät perustuvat nimensä mukaan tukiasemalla vastaanotettuun signaalin tehon arviointiin. RSS-menetelmät sopivat karkeaan paikan arviointiin ulkotiloissa. Etenemisvaimennusmallien ja vastaanotetun signaalitehon perusteella tukiasema voi arvioida laitteen etäisyyden tukiasemasta ja näin ollen hahmotella käyttäjälaitteen sijainnin ympyrän

kaarelle tukiaseman ympärille. Etenemisvaimennusmalleissa esiintyviä parametreja voidaan muuttaa ympäristön mukaan mahdollisimman tarkan sijaintitiedon saavuttamiseksi. Mikäli tukiaseman antenni käyttää tilasuodattimia (engl. Spatial Filter) suunnan antennin lähetystehoa tietylle sektorille, voidaan paikannustarkkuutta edelleen tarkentaa. Käyttäjälaitteen paikka tietyssä sektorissa oletetaan noudattavan Gaussin jakaumaa, joten käyttäjälaitteen paikan voidaan arvioida sijaitsevan todennäköisimmin sektorin keskellä. Kuvassa 7 on havainnollistettu esimerkki RSS-paikannuksesta, jossa antennit ovat tilasuodatettuja 120 asteen sektoreille. [22 s. 6–7]



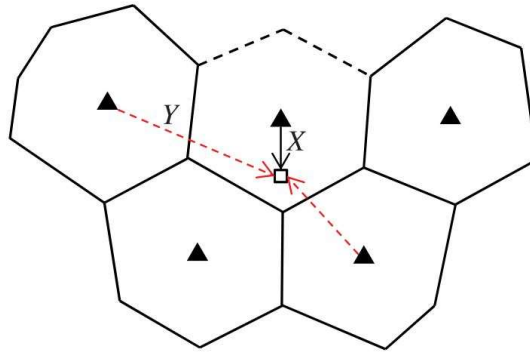
Kuva 7: paikannus vastaanotetun signaalitehon avulla. [22 s. 7]

NB-IoT-tekniikkaa on tutkittu myös sisätilapaikannuksen osalta. Sisätiloissa rakenteet estävät ja häiritsevät eteneviä signaaleja monitie-etenemisen, heijastumisen ja vaimentumisen muodossa, joten RSS-tekniikka ei tällöin ole ideaalinen sisätilapaikannukseen. Toinen vaihtoehto sisätilapaikannukselle on käyttää fyysisen kerroksen tiedonsiirtokanavasta saatua tietoa CSI-menetelmän (engl. Channel State Information) avulla NB-IoT-laitteen sijainnin hahmottelussa. Tällaisessa tapauksessa CSI edustaa tiedonsiirtokanavan ominaisuuksia käyttäjälaitteen ja tukiaseman välisessä viestinnässä. Tällaisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi monitie-eteneminen, heijastuminen ja vaimentuminen. Sisätiloista voidaan tällöin kerätä erilaisia kanavaprofiileja ja tallentaa tietyn pisteen paikkatieto CSI-tietokantaan. Näiden avulla käyttäjälaite voidaan paikantaa sisätiloissa sormenjälkiperusteisesti vertaamalla tiettyjä referenssipisteitä ja niiden kanavaprofiileja havaittuun kanavaan käyttäjälaitteen ja tukiaseman välillä [23].

3.3 Paikannuksen suorituskyky ja tarkasteltavat parametrit

Paikannuksen suorituskykyä etenkin OTDOA- ja RSS-perusteisissa sovelluksissa voidaan tarkastella erilaisten parametrien avulla. Vastaanotetun signaalin tehon ja aikaerojen arvioinnin lisäksi paikannuksen tarkkuuteen vaikuttaa monia asioita, kuten kohina ja interferenssi. Paikannustarkkuutta voidaan teoreettisesti arvioida erilaisten etenemisvaimennusmallien avulla. Eri etenemisvaimennusmalleja on useita ja niitä voidaan vaihdella tilanteen ja käyttökohteen mukaan. Tässä osiossa on tarkoitus tuoda esille yleisellä tasolla paikannusjärjestelmissä vaikuttavia seikkoja ja parametreja, joten tarkastellaan teoreettista perustaa vain yleisen etenemisvaimennusmallin osalta.

Kuten kappaleessa 3.2 mainittiin, OTDOA-paikannuksen tarkkuuteen vaikuttaa oleellisesti myös osallistuvien tukiasemien määrä. Yleisesti mobiiliverkko koostuu tietyn kokoisista soluista ja soluja palvelevista tukiasemista kuvan 8 mukaisesti.



Kuva 8: LTE-soluverkko ja paikannettava päätelaite. [24]

Yllä olevassa kuvassa LTE-tukiasema sijaitsee jokaisen solun keskellä. Käyttäjälaitteen sijainnin oletetaan olevan satunnaisesti jakautunut solun sisällä; muuttuja X kuvastaa satunnaismuuttujaa päätelaitteen etäisyydelle tukiasemasta, kun päätelaite sijaitsee tukiaseman kanssa samassa solussa. Satunnaismuuttuja Y kuvastaa käyttäjälaitteen etäisyyttä tukiasemasta, kun tukiasema sijaitsee tämänhetkisen solun ulkopuolella. Jotta paikannustarkkuus olisi riittävän hyvä, täytyy käyttäjälaitteen vastaanottaa mahdollisimman monelta eri etäisyyksillä olevilta tukiasemilta NPRS-signaali. Kuitenkin etäisyyden kasvaessa ja useampien tukiasemien lähettäessä referenssisignaaleja, myös SINR (engl. Signal to Interference and Noise Ratio) kasvaa. NB-IoT-päätelaitteilla on olemassa tietty kynnyksinen SINR-arvo, joten mikäli häiriö ja kohina kasvavat liian suuriksi, päätelaite ei voi vastaanottaa ja käsitellä NPRS-signaalia. Määritellään LTE-tukiaseman lähettämän signaalin etenemisvaimennus etäisyydelle d seuraavasti;

$$L(d) = \beta d_0^\alpha d^{-\alpha}, \quad (1)$$

jossa β on etenemisvaimennusvakio, d_0 on ennalta määrätty referenssietäisyys ja α on etenemisvaimennuseksponentti. Etenemisvaimennusvakio määritellään vastaanottimen laitteiston ominaisuuksien perusteella. Kun LTE-tukiaseman lähetysteho on P_t , niin saadaan vastaanotetun signaalin voimakkuudeksi etäisyydellä d

$$P_r(d) = L(d)P_t. \quad (2)$$

Kaavasta (2) voidaan edelleen johtaa SINR-arvo paikannettavalle laitteelle. Oletetaan paikannukseen osallistuvan i -kappaletta LTE-tukiasemia, joten tietyltä tukiasemalta vastaanotetulle signaalille SINR-kerroin on

$$SINR_i = \frac{P_r(d_i)}{I + NW}. \quad (3)$$

Kaavassa (3) d_i on päätelaitteen etäisyys tietystä LTE-tukiasemasta i , I on tukiasemien samanaikaisesta lähetyksestä johtuva kumulatiivinen häiriö (engl. Interference) ja W on tiedonsiirrossa käytetty kaistanleveys. Tiedonsiirtokanavassa signaaliin summautuu myös aina satunnaisuolentoista kohinaa, joka on kaavassa (3) merkattu muuttujalla N [24].

Edellä esiteltyjen kaavojen mukaan paikannus onnistuu, jos NPRS-signaalien teho on riittävä suhteessa häiriöön ja kohinaan. Tällöin SINR-suhde ylittää vastaanottimen kynnyksen prosessoida ja raportoida tukiasemille paikannuksessa käytettävää dataa. Paikannustarkkuutta OTDOA-järjestelmässä parantaa useamman tukiaseman osallistuminen paikannukseen. Toisaalta kuitenkin usean tukiaseman samanaikaisesti lähettämät signaalit summautuvat kumulatiivisesti häiriöksi I , joten tukiasemien määrän kasvaessa todennäköisyys samanaikaisille lähetyksille kasvaa. Tällöin siis myös liian suuri määrä osallistuvia LTE-tukiasemia voi lopulta olla epäedullinen paikannuksen suorituskyvyn kannalta. Paikannuksen suorituskykyyn voidaan todeta vaikuttavan kolme tekijää; käyttäjälaitetta ympäröivien tukiasemien sijainti niin palvelevassa solussa kuin naapurisolussa suhteessa päätelaitteeseen, paikannukseen osallistuvien tukiasemien määrä ja yksittäisten mittaustulosten tarkkuus [24].

4 PAIKANNUSMITTAUKSET NB-IOT-VERKOISSA

4.1 Mittausten järjestelyt

Käytännön mittaukset toteutettiin NB-LoT-laitteella ja niissä hyödynnettiin valmista loT-ratkaisua ja paikannusta ilman GPS:ää. Mittauksissa pyrittiin saamaan selville, kuinka hyvin ja tarkasti paikannus NB-loT-verkoissa toimii.

4.1.1 Mittalaitteet ja alustat

Työssä käytettiin mittalaitteena iProtoXi Oy:n valmistamaa Aistin Level -laitetta. Oulussa sijaitseva iProtoxi Oy on sensori- ja loT-teknologioihin erikoistunut yritys, jonka tavoitteena on edistää digitalisaatiota tarjoamalla asiakkailleen räätälöityjä ja helppokäyttöisiä loT-ratkaisuja. Aistin Level on yksi iProtoxi Oy:n tuotteista ja se sisältää monenlaisia erilaisia antureita mittaamaan esimerkiksi lämpötilaa, kiihtyvyyttä ja paikkatietoa. Aistin Level -laitetta voidaan käyttää erilaisissa sovelluksissa, kuten vesitankkien tai jäteastioiden täyttöasteiden mittaamisessa ja paikannusominaisuuden ansiosta esimerkiksi jäteastian sijaintia kyetään myös seuraamaan. Aistin Level on havainnollistettu kuvassa 9.



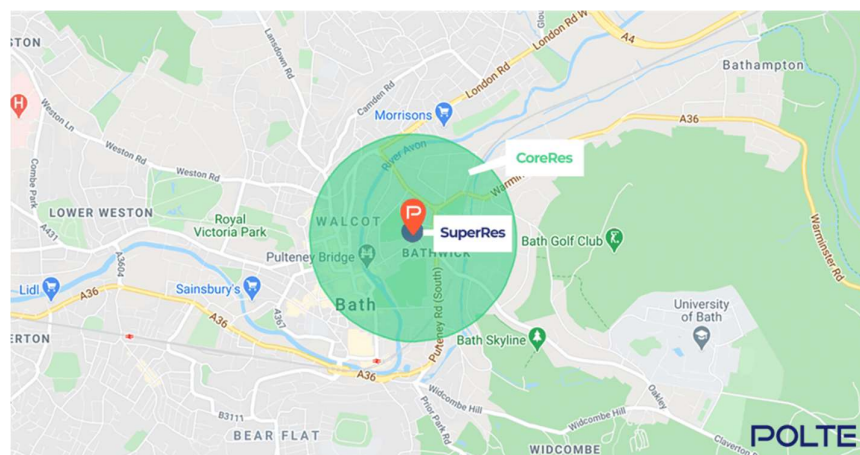
Kuva 9: Aistin Level. [26]

Työssä käytössä oleva laite käyttää NB-LoT-teknologiaa datan lähettämisessä erilliseen pilvipalveluun, josta dataa voidaan seurata ja analysoida. Laitteen asetuksia ja esimerkiksi datan lähetystiheyttä voidaan myös muuttaa pilvipalvelun käyttöliittymän kautta. Pilvipalvelusta dataa voidaan lähettää eteenpäin ulkoisille palveluille, joissa dataa voidaan käsitellä asiakkaan omissa järjestelmissä ja sovelluksissa. Mittauksissa käytettävä data lähetetään Tampereen Yliopiston palvelimelle, jonka perusteella datan mukana tuleva

paikkatieto visualisoidaan OpenStreetMap-karttapohjan avulla. Visualisoitava paikkatieto saadaan selville Aistin Level -laitteelta saadun datan ja POLTE-yrityksen API-rajapinnan (engl. Application Programming Interface) kautta [27].

4.1.2 POLTE-paikannusjärjestelmä

Työssä käytettävä mittalaite hyödyntää POLTE-yrityksen tarjoamaa paikannusominaisuutta, jossa paikkatieto hahmotetaan ilman GPS-järjestelmää. POLTE on erikoistunut soluverkkopohjaisiin paikannustekniikoihin, joiden tavoitteena on muuttaa IoT-markkinoita mahdollistamalla uusia ja tehokkaita paikannusratkaisuja alalla toimiville organisaatioille. Paikkatiedon laskemisessa käytetään laitteelta saatua dataa sen toimintaympäristöstä ja etenkin sitä palvelevasta tukiasemasta, sekä naapurisolujen tukiasemista. POLTE-ohjelmointirajapinnan kautta laite voi pyytää paikkatietoa, mikäli API-kutsussa määritellään laitetta palvelevan solun tukiaseman tunniste ja naapurisolujen tukiasemien tunnisteet. POLTE-yrityksen pilvipalvelussa tapahtuu varsinainen paikkatiedon laskenta. Pilvipalvelussa on aikaisemmin rekisteröity paikannettava laite, jonka ominaisuuksien perusteella laite voidaan paikantaa SR- tai CR-ominaisuuksia käyttämällä. SR on lyhennetty sanasta SuperRes ja CR on lyhennetty sanasta CoreRes. Nämä ominaisuudet eroavat toisistaan paikannustarkkuuden osalta: SR käyttää LTE-M-tekniikkaa yhdessä POLTE-yrityksen sovellusten avulla tähdäten mahdollisimman tarkkaan paikkatietoon. CR-ominaisuuden avulla saatava paikkatieto on hieman epätarkempi, mutta se tukee NB-IoT-tekniikkaa. CR-paikannuksessa hyödynnetään paikannussignaalien RSRP- ja RSRQ- arvoja ja vaihtoehtoisesti TA-arvoa (engl. Timing Advance). Vertailun vuoksi alla olevassa kuvassa 10 on havainnollistettu SR- ja CR- ominaisuuksilla saatavan paikkatiedon tarkkuutta.



Kuva 10: Paikannustarkkuus SR- ja CR- ominaisuuksilla. [25]

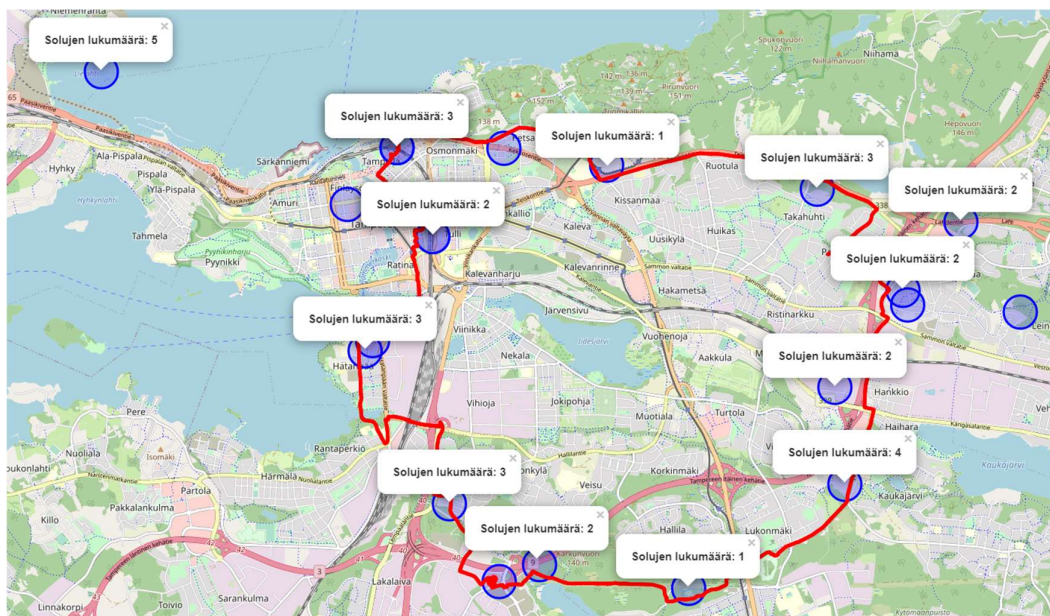
Paikannustarkkuuden parantamiseksi CR API-kutsussa voidaan määritellä TA-arvo, joka parantaa paikannusmittausten tarkkuutta. Tämän työn mittauksissa TA-arvo ja sen vaikutukset jätettiin huomioimatta ja paikannus perustui paikannussignaalin RSRP- ja RSRQ- arvoihin. Data saadaan asiakkaiden käyttöön pilvipalvelun kautta, johon laskettu data varastoidaan ja jonka kautta se välitetään muihin, asiakkaan määrittelemiin palveluihin ja sovelluksiin [25]. Tässä työssä paikannustulokset siirtyvät iProtoxi Oy:n pilvipalveluun, josta kaikki laitteelta kerätty data yhdessä paikkatiedon kanssa siirretään Tampereen Yliopiston palvelimelle analysointia varten.

4.2 Mittaukset

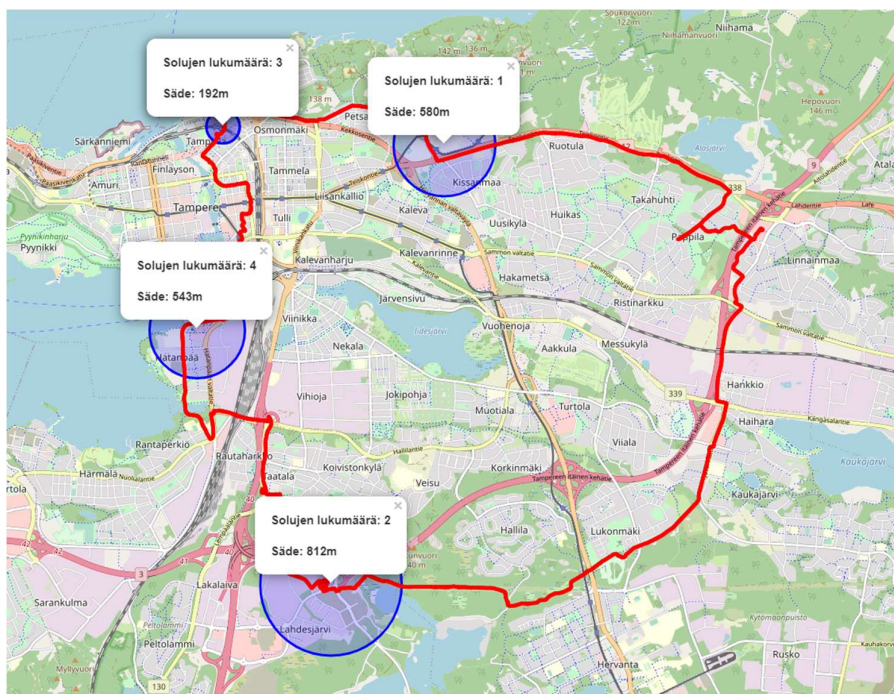
Mittauksissa selvitettiin NB-IoT-laitteelta saatavan datan avulla mitausten tarkkuutta ja toimivuutta kahdessa erilaisessa maastossa. Jokaisesta maastosta saaduista mittauksista muodostettiin visualisointi OpenStreetMap-karttapohjaan ja arvioitiin paikannuksen tarkkuutta erilaisin keinoin. Ensiksi arvioitiin paikannusmittausten sijaintia suhteessa kuljettuun reittiin. Kuljettu reitti mitattiin matkapuhelimella käyttäen G-NetTrack Pro- sovellusta, joka hyödyntää satelliittiperusteista paikannusta. Seuraavaksi esitettiin 1–5 kappaletta tarkimpia mitaustuloksia ja lopuksi havainnollistettiin yksittäinen epätarkin mitaustulos. NB-IoT-laite lähettää viestejä 10 minuutin välein, joten mitaustulosten läheystiheys on GPS-mittauksiin verrattuna melko harva.

4.2.1 Tampereen kaupunkialue

Tampereen kaupungin mittaukset edustavat isompaa kaupunkialuetta, joiden tarkoituksena oli selvittää kaupunkialueen mitausten tarkkuus verrattuna harvemmin asutuille alueille. Mittaukset on esitetty kuvissa 11, 12 ja 13.



Kuva 11: Mittauspisteiden osuminen reitille kaupunkialueella. Karttapohja: OpenStreet-Map.



Kuva 12: Tarkimmat mittauspisteet kaupunkialueella. Karttapohja: OpenStreetMap.

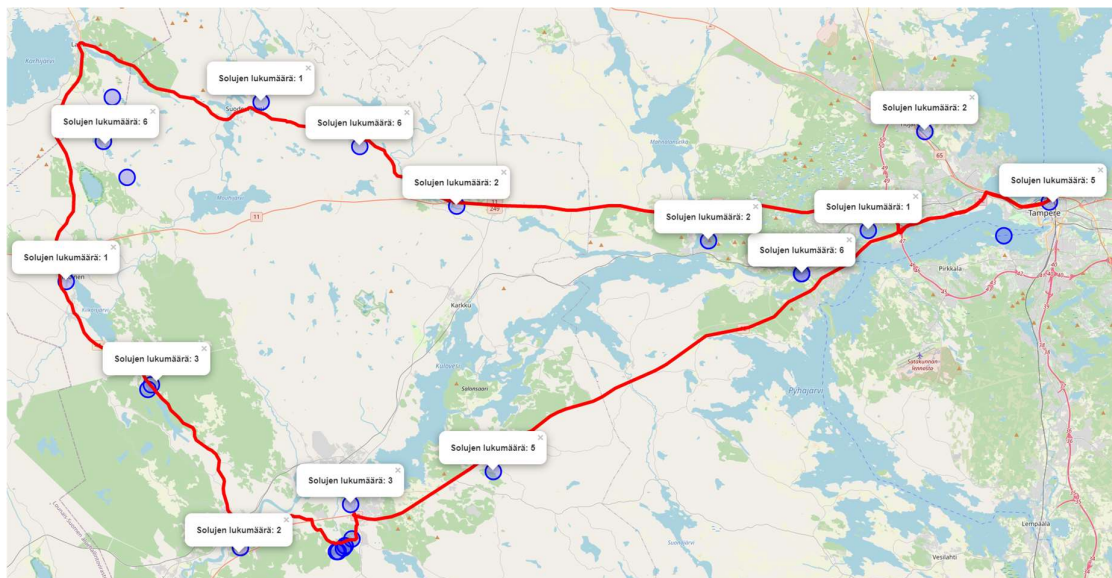


Kuva 13: Epätarkin yksittäinen mittaus kaupunkialueella. Karttaphoja: OpenStreetMap.

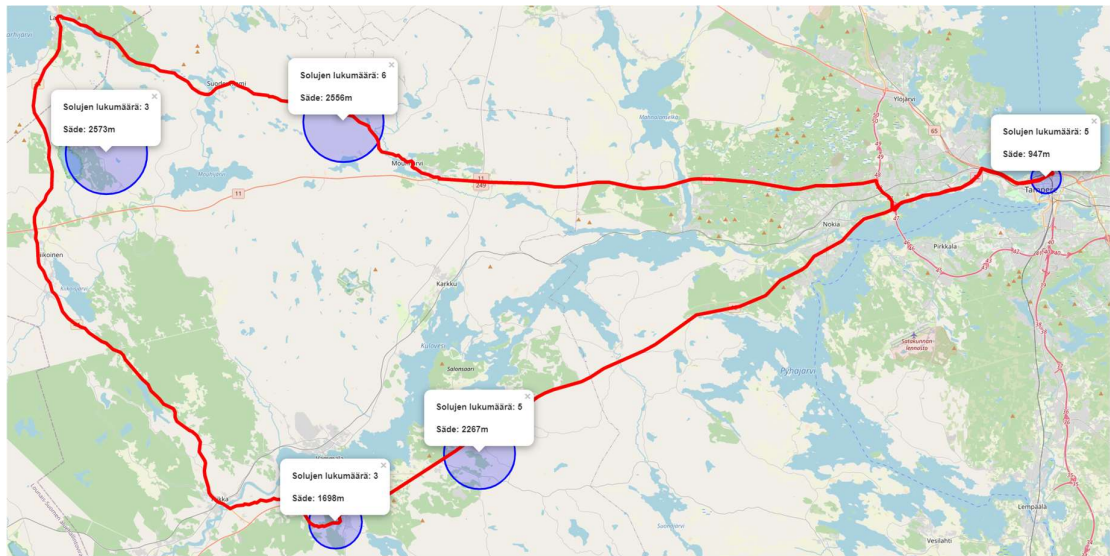
Edellä esitetyt kolme mittaustapausta toistettiin myös harvemmin asutulla alueella.

4.2.2 Mittaukset harvaan asutulla alueella

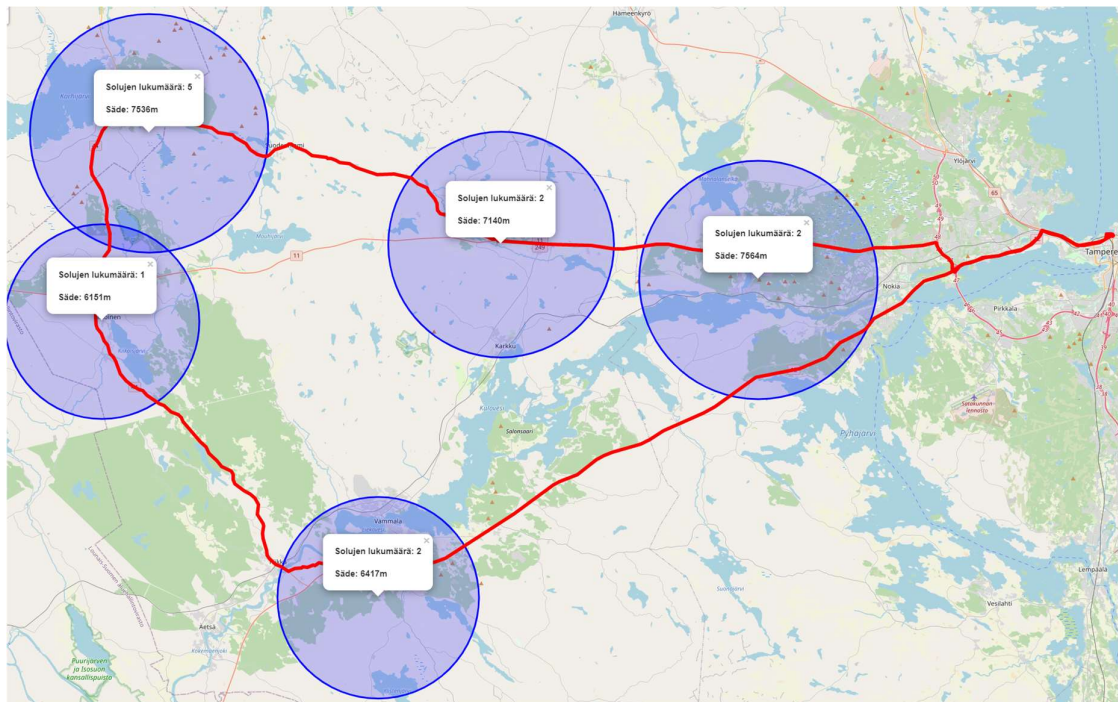
Seuraavaksi suoritettiin mittaukset harvaan asutulla alueella. Harvaan asuttuna alueena toimi Pirkanmaalla sijaitseva maaseutualue.



Kuva 14: Mittauspisteiden osuminen reitille harvaan asutulla alueella. Karttapohja: OpenStreetMap.



Kuva 15: Tarkimmat mittauspisteet harvaan asutulla alueella. Karttapohja: OpenStreet-Map.



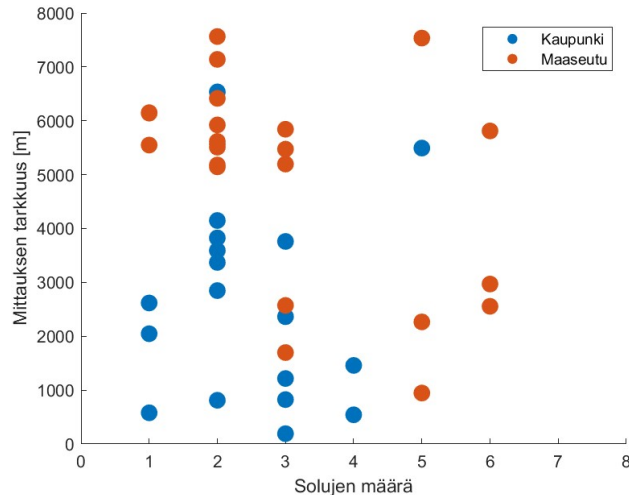
Kuva 16: Epätarkimmat mittaukset harvaan asutulla alueella. Karttapohja: OpenStreet-Map.

Kaupunkialueen ja maaseutualueen mittauksissa esiintyy selkeästi eroja toisiinsa nähden. Näitä eroja esitellään ja analysoidaan niiden syitä tarkemmin luvussa 4.3.

4.3 Tulokset ja niihin vaikuttavat tekijät

Mittauksissa Tampereen kaupunkialueella voidaan huomata eroja verrattuna maaseudun mittauksiin niin mittauspisteiden osumisessa kuljetulle reitille, kuin mittausten tarkkuuksissa. Maaseutualueen mittauksissa kuljettiin autolla, kun taas kaupunkialueen mittauksissa kuljettiin polkupyörällä. Kaupunkialueella mittaukset osuivat reitille pääosin hyvin, vaikka muutamia poikkeuksia voidaan mittauspisteistä havaita. Mittauspisteet osuivat reitille etenkin sellaisilla alueilla, joissa maasto oli tasaista ja päätelaite havaitsi palvelevan solun lisäksi myös naapurisoluja. Hyvin reitille osuvilla alueilla myös esimerkiksi korkeita rakennuksia esiintyi vähemmän. Vastaavasti keskusta-alueella ja tiheästi asutuilla alueilla paikannusmittauksissa esiintyi herkemmin poikkeamia reitiltä. Tällaisilla alueilla, joilla signaalin etenemiselle on paljon esteitä, tukiaseman vastaanottaman signaalin voimakkuuteen voivat vaikuttaa esimerkiksi signaalien heijastuminen tai varjostuminen rakennusten pinnoista. Tällöin kaukaisemmat solut voivat aistia voimakkaamman signaalin kuin varsinainen laitetta palveleva solu, jolloin myös paikannuksen tarkkuus heikkenee. Sama ilmiö on havaittavissa myös kuvissa 12 ja 13, joissa esitettiin tarkimmat mittaukset ja epätarkin mittaus kaupunkialueelta.

Maaseutualueen mittauksissa mittauspisteet osuivat keskimäärin selkeästi kauemmaksi kuljetusta reitistä kuin kaupunkialueella. Tämä selittyy pääosin sillä, että maaseudun alueella laite kuulee myös vähemmän soluja, sekä etäisyydet palvelemaan soluun ja naapurisoluihin ovat pidemmät. Myös alueiden säteet, jossa paikannettava laite todennäköisesti sijaitsee, ovat suurempia maaseutualueen mittauksissa kuin kaupunkialueen mittauksissa samoista syistä. Kuvassa 15 tarkin mittaus kaupungin ulkopuolella osuu 1698 metrin säteelle, kun taas kaupunkialueella kuvassa 12 tarkin mittaus oli 192 metrin säteellä. Kaikki kaupunkialueella mitatut viisi tarkinta mittausta osuivat pienemmälle säteelle kuin maaseutualueen tarkin mittaus. Samoin myös epätarkimmissa mittauksissa maaseutualueen mittauspisteet olivat huomattavasti epätarkempia kuin kaupunkialueella. Mittausten tarkkuus havaittujen solujen funktiona on esitetty pistekaaviona kuvassa 17.



Kuva 17: Mittausten tarkkuus havaittujen solujen funktiona.

Kuvassa 17 siniset pisteet kuvastavat kaupunkialueen mittauksia ja punaiset pisteet kuvastavat maaseutualueen mittauksia. Mittauspisteiden tarkkuuksien keskiarvo oli kaupunkialueella 2,6 km kun taas maaseutualueella mittausten keskiarvo oli 5,0 km.

Kuvista 11 ja 14 voidaan myös huomata muutaman mittauspisteiden olevan keskimääräistä kauempana mitatusta reitistä vesistöalueen lähellä. Näissä pisteissä laitteen oletettu sijainti on siirtynyt selkeästi järven puolelle, vaikka kuultuja soluja on vähintään saman verran kuin muissa mittauspisteissä. Koska näissä mittauksissa laitteen paikannus suoritettiin tukiasemalla vastaanotetun signaalitehon avulla, niin kuullut solut esimerkiksi järven yli vääristävät mittauspisteen sijaintia. Järven yllä signaalin etenemisellä ei ole usein paljoa esteitä, sekä veden pinnasta heijastuvat signaalit säilyttävät hyvin signaalitehoaan, joten järven vastarannalla oleva solu voi havaita suhteellisen voimakkaita signaaleja sen kulkemaan matkaan nähden. Kaupungissa ja esimerkiksi metsäisessä maastossa signaalin voimakkuus heikkenee taas nopeammin matkan kasvaessa, kun maaston muodot ja esteet kulkureitillä heikentävät signaalin tehoa. Tällaista vääristymää voidaan torjua määrittelemällä TA-arvo, joka jätettiin edellä kuvatuissa mittauksissa huomioimatta. TA-arvo kuvastaa aikaa, joka signaalilla kestää sen kulkiessa päätelaitteelta tukiasemalle ja se kuuluu LTE-verkossa päätelaitteen ja tukiaseman väliseen synkronointiprosessiin. TA-arvon ja päätelaitteen arvioidun etäisyyden korrelaation avulla saadaan parempi paikannustarkkuus, sillä signaaleilla kestää etenemisessä kauemmin pidemmän kantaman päähän, vaikka vastaanotettu signaaliteho olisikin suurempi. [29] Mittaustulokset myös mitattiin käyttämällä Suomalaisen matkapuhelinoperaattorin, Elisa Oyj:n matkapuhelinverkkoa. Mittaustuloksiin vaikuttaa osaltaan myös se, kuinka monta solua laite pystyy havaitsemaan, joten eri operaattoreiden verkoissa voitaisiin myös saada erilaisia mittaustuloksia.

Mittaustulokset niin kaupunkialueella kuin maaseudulla osuivat keskimäärin lähelle kuljettua reittiä, vaikka mittausten tarkkuuksissa oli paikoin suurta vaihtelua. Monissa nykyisissä NB-LoT-sovelluksissa ymmärretään soluverkkopohjaisen paikannuksen olevan yhä kehittymässä ja täten paikannusta hyödyntävät järjestelmät sietävät virheitä paikannustarkkuuksissa. Tällaisia sovelluksia voisi olla esimerkiksi rekkojen konttien seuranta, jolloin paikannustarkkuudeksi saattaa riittää kilometrien säde. Täten suoritettut mittaukset vastaavat oletettuja paikannustarkkuuksia etenkin huomioiden TA-arvon puuttumisen paikannuksesta.

5 YHTEENVETO

IoT-markkinoilla kysynnän ja käyttökohteiden monimuotoistumisen takia laitteilta ja verkoilta vaaditaan myös enemmän. Tulevaisuuden arvioiden mukaan internetiin liitetään vuosittain miljoonia uusia IoT-laitteita, joilla on erilaisia vaatimuksia ja käyttökohteita. Esineiden internet ja siihen liittyvät teknologiat kehittyvät jatkuvasti ja yksityiset yritykset, sekä alakohtaisia standardeja tuottavat organisaatiot pyrkivät vastaamaan nousujohteiseen kehitykseen mahdollisimman ketterästi. Esineiden internetin odotetaan mullistavan ihmisten jokapäiväistä elämää ja auttavan esimerkiksi energiansäästöissä tai omaisuuden seurannassa.

Tässä työssä käsiteltävät pitkän kantaman verkot ovat yksi IoT-verkkojen kehitysalueista. Pitkän kantaman IoT-verkkoja voidaan toteuttaa erilaisin keinoin, mutta yhteisinä vaatimuksina näille teknologioille pätee pitkien kantamien mahdollistaminen, vähäinen virrankulutus ja kustannukset, sekä kapea tiedonsiirtokaista. Nämä vaatimukset asettavat reunaehjoja teknologian suorituskyvylle ja sovelluksille. Esimerkiksi NB-IoT-tekniikassa on rajoitteita lähetettävien datamäärien ja tiedonsiirron viiveiden osalta.

NB-IoT-tekniikkaan kehitetään jatkuvasti uusia ominaisuuksia samalla kun parannetaan olemassa olevaa toiminnallisuutta. Yksi suhteellisen uusi ominaisuus NB-IoT-tekniikassa on paikannus soluverkkopohjaisesti ilman, että järjestelmään vaaditaan erillistä GPS-paikannusjärjestelmää. Paikannus luo uusia ulottuvuuksia NB-IoT:n käyttökohteille esimerkiksi omaisuuden seurannan kannalta. Myös monet olemassa olevat sovellukset hyötyvät paikkatiedosta.

Työssä suoritetuissa mittauksissa havaittiin soluverkkopohjaisen paikannuksen olevan huomattavasti epätarkempi kuin GPS-paikannuksessa, mutta mittaustulokset vahvistavat NB-IoT-verkon paikannuksen toimivan myös haastavammissa olosuhteissa kaupunkialueen ulkopuolella. Mittaustuloksissa esiintyi myös eroja paikannuksen tarkkuudessa kaupunkialueen ja maaseutualueen välillä. Tulevaisuudessa pitkän kantaman verkkojen kehitys, sekä 5G-tekniikan yleistyminen kattamaan enemmän IoT-sovelluksia tulee muuttamaan tekniikan kehitystä alalla yhä parempaan suuntaan. Nähtäväksi jää, milloin pitkän kantaman IoT-tekniikoita ja soluverkkopohjaista paikannusta aletaan kehittämään laajemmin myös 5G-aikakaudelle ja kuinka tulevaisuuden verkkotekniikat mullistavat LPWAN-teknologioita.

LÄHTEET

- [1] Davies, J. (N. John), and Carolina Fortuna. *The Internet of Things : from Data to Insight*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2020. Web. (7.2.2022)
- [2] Henry, Jerome et al. *IoT-Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things*. Cisco Press, 2017. Print. (7.2.2022)
- [3] Rahman, Azamuddin: Comparison of Internet of Things (IoT) Data Link Protocols. St.Louis; Washington University, Päivitetty 30.11.2015. Saatavissa (viitattu 7.2.2022) : https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse570-15/ftp/iot_dlc/index.html
- [4] Liberg, Olof. *Cellular Internet of Things : Technologies, Standards, and Performance*. London, England: Academic Press, 2018. Print.
- [5] Mekki, Kais et al. "A Comparative Study of LPWAN Technologies for Large-Scale IoT-Deployment." *ICT express* 5.1 (2019): 1–7. Web.
- [6] Ayoub, Wael et al. "Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT-in LPWANs Standards and Supported Mobility." *IEEE Communications surveys and tutorials* 21.2 (2019): 1561–1581. Web.
- [7] LoRa Alliance. *What is LoRaWAN Specification*. Saatavilla: (viitattu 8.2.2022) <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>
- [8] Ratasuk, Rapeepat et al. "Overview of Narrowband IoT-in LTE Rel-13." 2016 *IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*. IEEE, 2016. 1–7. Web.
- [9] Hoglund, Andreas et al. "Overview of 3GPP Release 14 Enhanced NB-IoT." *IEEE network* 31.6 (2017): 16–22. Web.
- [10] Francisco Javier Rivas Tocado, and Pilar Rodríguez. "Evolution and Testing of NB-IoT-Solutions." *Applied sciences* 10.21 (2020): 7903–. Web.
- [11] Chen, Min et al. "Narrow Band Internet of Things." *IEEE access* 5 (2017): 20557–20577. Web.
- [12] Sinha, Rashmi Sharan, Yiqiao Wei, and Seung-Hoon Hwang. "A Survey on LPWA Technology: LoRa and NB-IoT." *ICT express* 3.1 (2017): 14–21. Web.
- [13] ElNashar, Ayman, and Mohamed El-saidny. *Practical Guide to LTE-A, VoLTE and IoT*. First edition. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley, 2018. Web.
- [14] Emmanuel Migabo, Karim Djouani, and Anish Kurien. "A Modelling Approach for the Narrowband IoT-(NB-IoT) Physical (PHY) Layer Performance." *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE) Conference Proceedings*. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE), 2018. 5207–. Print.
- [15] Kanj, Matthieu, Vincent Savaux, and Mathieu Le Guen. "A Tutorial on NB-IoT-Physical Layer Design." *IEEE Communications surveys and tutorials* 22.4 (2020): 2408–2446. Web.

- [16] Mwakwata, Collins Burton et al. "Narrowband Internet of Things (NB-IoT): From Physical (PHY) and Media Access Control (MAC) Layers Perspectives." *Sensors (Basel, Switzerland)* 19.11 (2019): 2613–. Web.
- [17] Figueiras, João., and Simone. Frattasi. *Mobile Positioning and Tracking from Conventional to Cooperative Techniques*. Chichester, West Sussex;: Wiley, 2010. Print.
- [18] Li, You et al. "Toward Location-Enabled IoT-(LE-IoT): IoT-Positioning Techniques, Error Sources, and Error Mitigation." *IEEE internet of things journal* 8.6 (2021): 4035–4062. Web.
- [19] Sha Hu et al. "Improving the Performance of OTDOA Based Positioning in NB-IoT-Systems." *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*. Vol. 2018-. IEEE, 2017. 1–7. Web.
- [20] Lin, Xingqin et al. "Positioning for the Internet of Things: A 3GPP Perspective." (2017): n. pag. Print.
- [21] Sven Fischer. "Observed Time Difference Of Arrival (OTDOA) Positioning in 3GPP LTE". Päivitetty 6.6.2014. Saatavilla (viitattu 10.3.2022): <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/otdoa-positioning-in-3gpp-lte.pdf>
- [22] Janssen, Thomas, Rafael Berkvens, and Maarten Weyn. "RSS-Based Localization and Mobility Evaluation Using a Single NB-IoT-Cell." *Sensors (Basel, Switzerland)* 20.21 (2020): 1–14. Web.
- [23] Song, Qianwen et al. "CSI Amplitude Fingerprinting-Based NB-IoT-Indoor Localization." *IEEE internet of things journal* 5.3 (2018): 1494–1504. Web.
- [24] Tong, Fei, Yuyi Sun, and Shibo He. "On Positioning Performance for the Narrow-Band Internet of Things: How Participating eNBs Impact?" *IEEE transactions on industrial informatics* 15.1 (2019): 423–433. Web.
- [25] POLTE. Polte Location API. Saatavilla: (viitattu: 04.04.2022) <https://www.polte.com/partners/developers/try-the-polte-location-api/>
- [26] iProtoxi. Aistin Level. Saatavilla: (viitattu 04.04.2022) <https://www.iprotoxi.fi/WP/wp-content/uploads/2021/08/Aistin-Level.png>
- [27] iProtoxi. Saatavilla: (viitattu 04.04.2022) <https://www.iprotoxi.fi>
- [28] Mahyuddin, M.F.M et al. "Overview of Positioning Techniques for LTE Technology." *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering* 9.2-13 (2017): 43–50. Print.
- [29] Hunt, Allison et al. "Effects of Channel Environment on Timing Advance for Mobile Device Positioning in Long-Term Evolution Networks." *2016 50th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. IEEE, 2016. 643–647. Web.